

УДК 621.385.6

ГИРОТРОН НА СИММЕТРИЧНОЙ ЗАМЕДЛЕННОЙ E_{0i} -МОДЕ ГОФРИРОВАННОГО ВОЛНОВОДА

А.А. КУРАЕВ, В.В. МАТВЕЕНКО, А.К. СИНИЦЫН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 30 августа 2011

На основе моделирования и оптимизации параметров показано, что гиротрон на замедленной E_{0i} -моде гофрированного волновода имеет не худшие выходные характеристики (КПД, мощность, коэффициент усиления), чем обычный гиротрон на H_{0i} -моде квазирегулярного волновода, но при этом требует приблизительно в два раза меньшую индукцию магнитостатического поля в области взаимодействия. Последнее весьма существенно как с точки зрения снижения веса прибора, так и с точки зрения перспектив повышения рабочих частот гиротронов.

Ключевые слова: гиротрон, гиро-ЛБВ гофрированный волновод, выходная мощность коэффициент усиления, КПД.

Введение

Гиротрон является уникальным прибором коротковолновой части СВЧ-диапазона, обеспечивающим в этом диапазоне большие мощности (до 2 МВт) при достаточно высоких КПД. Основным же недостатком этого прибора является необходимость большой величины индукции магнитостатического поля в области взаимодействия: $B_0 = (107/\lambda \cdot n)$ кГс. Здесь n – номер рабочей гармоники циклотронной частоты, λ – длина рабочей волны в мм. Таким образом, уже на $\lambda = 10$ мм при $n=1$ необходимо поле в 10,7 кГс. Это приводит к большому весу электромагнита: так, для технологических гиротронов на $\lambda = 10$ мм этот вес лежит в пределах 79–600 кг, а мощность питания – от 0,5 до 1 выходной мощности гиротрона [1]. С другой стороны, из-за требования высоких B_0 , которые практически нереализуемы ни в криогенных, ни в импульсных электромагнитах, невозможно продвижение гиротронов в субмиллиметровый диапазон длин волн [1].

Однако использование замедленных волн в периодических волноводных системах благодаря эффекту Доплера позволяет существенно понизить требуемую для резонатора величину циклотронной частоты электронов, а, следовательно, и B_0 . Как показали предварительные исследования, обычная для гиротронов рабочая мода H_{0i} в гофрированном волноводе не замедляется. Поэтому в настоящей статье рассматривается гиротрон на замедленной E_{0i} -моде гофрированного волновода, которая может быть замедлена до 0,7 скорости света. Такого типа гиротрон исследуется впервые.

Схема прибора и принцип действия

На рис. 1 изображен один из рассматриваемых вариантов конструкции гиротрона на замедленной симметричной E -волне. На вход области взаимодействия в виде отрезка полого цилиндрического гофрированного волновода 5 подается винтовой электронный поток 3, сформированный электронной пушкой 1,2. В области взаимодействия 5 реализуются условие гирорезонанса с основной замедленной пространственной гармоникой возбуждаемого электромаг-

нитного поля. Вывод СВЧ-мощности производится через выходной рупор 6. Отрабатывший электронный поток осаждается на стенку волновода сразу за областью взаимодействия. Резонансная канавка 4 играет роль как загряздающего катода фильтра для E_{0i} – волны, так и создает условия для начальной модуляции электронного пучка, образуя совместно с областью 5 и участком дрейфа двухкаскадный генератор с обратной связью по отраженной от канавки встречной волны ($b_0=5$, $L_v=n_v \cdot d_v=25-30$).

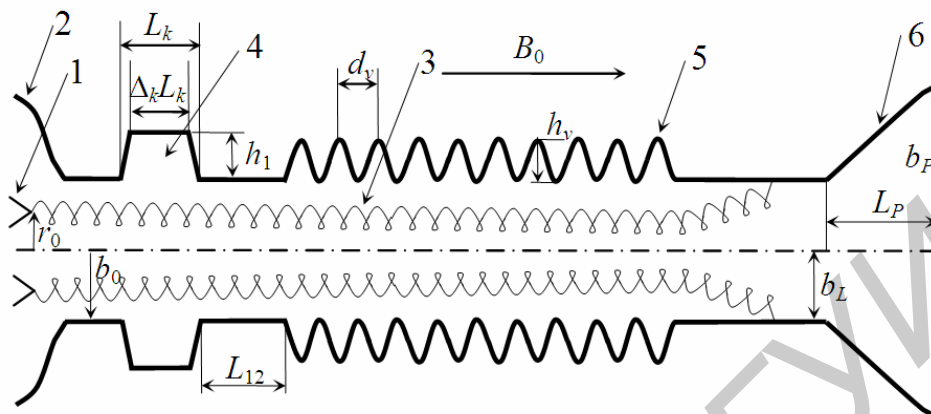


Рис. 1. Схема гиротрона: 1, 2 – катод и анод, формирующие трубчатый, спирализованный электронный поток; 3, 4 – модулирующая канавка, 5 – периодическая замедляющая гребенка, 6 – выходной рупор

Наиболее эффективной процедурой при расчете возбуждаемого на заданной частоте СВЧ-поля в отрезке нерегулярного волновода как с вычислительной стороны, так и в отношении физической интерпретации представляется метод, основанный на отображении произвольно-нерегулярной внутренней поверхности волновода на регулярный цилиндр с круговым сечением. В преобразованной (косоугольной) системе координат решение представляется в виде связанных нормальных волн с использованием проекционной процедуры. При этом амплитуды связанных волн определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, вид которых определяется профилем неоднородного волновода. Граничные условия к этой системе ставятся в начальном и конечном сечениях отрезка нерегулярного волновода (двухточечная задача). Решение самосогласованной задачи возбуждения электромагнитного поля электронным потоком в установившемся режиме производится итерационно, путем поочередного решения электродинамической задачи и уравнений движения электронов – «крупных» частиц, моделирующих электронный пучок.

Рассматриваемая математическая модель

Опуская громоздкие описания проекционной процедуры и применения закона сохранения заряда при нахождении интегралов, содержащих электронный поток, приведем здесь полученную самосогласованную систему обыкновенных дифференциальных уравнений [1], которая описывает процессы возбуждения симметричных E_{0i} -волн в отрезке продольно нерегулярного круглого волновода с учетом омических потерь в стенке и сформулируем граничные условия, используемые для расчета гиротрона.

Уравнения для расчетных $i = 1..M_s$ амплитуд возбуждаемых волн:

$$\frac{d\dot{A}_{mi}}{dz} = (mW\dot{V}_{mi} + v_{0i}\dot{C}_{mi}) + (1-j)2S_{\sigma m} \frac{\sqrt{1+(\partial b/\partial z)^2}}{b} \sum_k \dot{V}_{mk} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})}; \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\dot{V}_{mi}}{dz} &= -m \cdot W \left\{ \dot{A}_{mi} + \left(\frac{\partial b}{\partial z} \right)^2 \cdot \left[\dot{A}_{mi} \frac{1}{3} \left(1 + \frac{4}{v_{0i}^2} \right) + \sum_{k \neq i} \frac{4 \cdot (v_{0i}^2 + v_{0k}^2)}{(v_{0i}^2 - v_{0k}^2)^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{A}_{mk} \right] - \right. \\
&- b \frac{\partial b}{\partial z} \cdot \left(-\frac{\dot{C}_{mi}}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2 \cdot v_{0k}}{v_{0i}^2 - v_{0k}^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{C}_{mk} \right) \left. \right\} + \\
&+ \frac{\sigma_0}{e_{0i} b} \cdot \left(\frac{1}{N_e} \sum_{l=1}^{N_e} J_1 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \left(\frac{\beta_{rl}}{\beta_{zl}} - \frac{r_l}{b} \frac{\partial b}{\partial z} \right) \right) j e^{-jmW\theta_l}; \\
\dot{C}_{mi} &= -\frac{v_{0i} \dot{V}_{si}}{m \cdot W \cdot b^2} + \frac{\partial b}{b \partial z} \times \left(-\frac{\dot{A}_{mi}}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2 \cdot v_{0i}}{v_{0k}^2 - v_{0i}^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{A}_{mk} \right) - \\
&- \frac{j\sigma_0}{m \cdot W \cdot e_{0i} \cdot b^2} \cdot \frac{1}{N_e} \sum_{l=1}^{N_e} J_0 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) e^{-jmW\theta_l}; \quad i, k = 1..m_s.
\end{aligned}$$

Уравнения движения крупных частиц:

$$\begin{cases}
\frac{dP_{rl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}} \left(\frac{\gamma_l \beta_{\varphi l}^2}{r_l} - E_r - \beta_{\varphi l} F_z + \beta_{zl} B_\varphi \right); \\
\frac{dP_{\varphi l}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}} \left(\frac{\gamma_l \beta_{rl} \beta_{\varphi l}}{r_l} - \beta_{zl} F_r + \beta_{rl} F_z \right); \\
\frac{dP_{zl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}} (-E_z - \beta_{rl} B_\varphi + \beta_{\varphi l} F_r); \\
\frac{dr_l}{dz} = \frac{\beta_{rl}}{\beta_{zl}}; \quad \frac{d\varphi_l}{dz} = \frac{\beta_{\varphi l}}{r_l \beta_{zl}}; \quad \frac{d\theta_l}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}};
\end{cases} \quad (2)$$

$$\bar{P}_l = \gamma_l \bar{\beta}_l; \quad \gamma_l = 1 / \sqrt{1 - \bar{\beta}_l^2} = \sqrt{1 + P_{rl}^2 + P_{\varphi l}^2 + P_{zl}^2}.$$

При моделировании гиротрона начальные условия для крупных частиц, вращающихся относительно ведущего центра r_0 и расставленных по окружности монотрубки радиуса a , задавались следующим образом

$$\begin{aligned}
\Phi_l &= 2\pi(l - 0,5) / N_e; \quad l = 1..N_{e1}; \quad r_l(0) = \sqrt{a^2 + r_0^2 + 2ar_0 \cos \Phi_l}; \\
\theta_l(0) &= 0; \quad \varphi_l(0) = \arccos((r_0 + a \cos \Phi_l) / r_l(0)) \text{sign}(\pi - \Phi_l); \\
\beta_{zl}(0) &= \beta_{z0}; \quad \beta_{rl}(0) = -\beta_{r0} \sin(\Phi_l - \varphi_l(0)); \quad \beta_{\varphi l}(0) = \beta_{\varphi 0} \cos(\Phi_l - \varphi_l(0)).
\end{aligned}$$

Выражение физических ВЧ-полей через расчетные амплитуды с учетом статической части поля пространственного заряда:

$$\begin{cases}
E_r = -\frac{1}{b} \sum_m \sum_{i=1}^{M_s} J_1 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \text{Re} \left(\dot{A}_{mi} e^{jmW\theta_l} \right) - S_{qr}; \\
E_z = \text{Re} \left[\sum_m \sum_{i=1}^{M_s} J_0 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \dot{C}_{mi} \cdot e^{jmW\theta_l} + \frac{r_l \partial b}{b^2 \partial z} \sum_m \sum_{i=1}^{m_s} J_1 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \dot{A}_{mi} \cdot e^{jmW\theta_l} \right]; \\
B_\varphi = \frac{1}{b} \sum_m \sum_{i=1}^{M_s} J_1 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \text{Re} \left(-j \dot{V}_{mi} e^{jmW\theta_l} \right).
\end{cases} \quad (3)$$

магнитостатическое фокусирующее поле:

$$\begin{cases} F_r = -\frac{1}{2}r_l \frac{\partial F_0(z)}{\partial z} + \dots; \\ F_z = F_0(z) - \frac{1}{4}r_l^2 \frac{\partial^2 F_0(z)}{\partial z^2} + \dots; \quad F_0 = \frac{B'_0(z)e}{m_0\omega_0}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $B'_0(z)$ – распределение z -составляющей индукции магнитного поля вдоль оси, r_0 – средний безразмерный радиус трубчатого электронного потока на входе в область взаимодействия, совпадающий с радиусом ведущего центра электронных ротаторов (здесь рассматривается одна трубка), $a = \beta_{t0}\gamma_0 / F_0(0)$ – ларморовский радиус, $q_0 = \beta_{t0} / \beta_{z0}$ – питч-фактор,

$$S_{qr} = \frac{\sigma_0}{2r} \left(\frac{1}{\beta_{z0}} - \beta_{z0} \right) - \text{статическая составляющая поля пространственного заряда, } M_s - \text{количество волн, учитываемых при расчете.}$$

Безразмерные параметры:

$$e_{oi} = 0,5J_1^2(v_{oi}), \quad \sigma_0 = \frac{eI_0}{\pi\epsilon_0 m_0 c^3}; \quad S_{\sigma m} = \frac{W_{\sigma m}^0}{(1+j)\mu_0 c} = \sqrt{\frac{\pi m W}{\sigma \lambda_0 \mu_0 c}};$$

Заметим, что уравнения возбуждения (1)–(4) включают как вихревую, так и потенциальную («поле пространственного заряда») составляющие полного поля на частоте $m\omega_0 W$.

Сформулируем граничные условия для амплитуд $\dot{A}(z)$, $\dot{V}(z)$ в (1). Предполагаем, что при $z \leq 0$ и $z \geq L$ волновод регулярный. Обозначим амплитуды прямой и встречной E_{0m} – волн регулярного волновода как \dot{e}_{0mi}^{\pm} для $z \leq 0$, \dot{e}_{Lmi}^{\pm} для $z \geq L$.

При постановке краевой задачи на входе ЭДС задается амплитуда прямой волны \dot{e}_{0mi}^+ , а на выходе контролируется величина амплитуды встречной волны \dot{e}_{Lmi}^- (при условии согласования $\dot{e}_{Lmi}^- = 0$).

В этом случае граничные условия для амплитуд E_{0i} -волн можно записать в следующем, более удобном при моделировании приборов виде:

$$\begin{aligned} W \cdot \dot{A}_{mi}(0) + jk_{0i}^e \cdot \dot{V}_{mi}(0) &= jk_{0i}^e W \cdot 2b(0)\dot{e}_{0mi}^+, \\ -W \cdot \dot{A}_{mi}(L) + jk_{Li}^e \cdot \dot{V}_{mi}(L) &= jk_{Li}^e W \cdot 2b(L)\dot{e}_{Lmi}^-, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{здесь } k_i^e = \begin{cases} \sqrt{W^2 - (v_{oi}/b)^2}; & \text{если } W > v_{oi}/b - \text{распространяющиеся волны,} \\ -j\sqrt{(v_{oi}/b)^2 - W^2}; & \text{если } W < v_{oi}/b - \text{закритические волны.} \end{cases}$$

Безразмерная мощность, переносимая волновым полем через поперечное сечение волновода, в выбранных переменных имеет вид:

$$P(z) = \sum_{mi} e_{oi} \cdot \text{Im} \left[\dot{A}_{mi}(z) \cdot \dot{V}_{mi}^*(z) \right]. \quad (6)$$

Эффективность взаимодействия определяется следующими соотношениями:

1) через мощность возбужденных потоком волн («волновой» КПД):

$$\eta_{mi}^v(z) = e_{oi} \frac{\text{Im} \left[\dot{A}_{mi}(z)\dot{V}_{mi}^*(z) - \dot{A}_{mi}(0)\dot{V}_{mi}^*(0) \right]}{(\gamma_0 - 1)\sigma_0}; \quad \eta^v = \sum_i \sum_m \eta_{mi}^v; \quad (7)$$

2) через потерю кинетической энергии электронным потоком («электронный» КПД):

$$\eta^e(z) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \frac{\gamma_0 - \gamma_l(z)}{\gamma_0 - 1}. \quad (8)$$

Поперечную группировку электронов на основной гармонике определяет функция группировки G_{\perp} :

$$G_{\perp}(z) = \frac{1}{N_e} \left[\left(\sum_{l=1}^{N_e} \frac{\beta_{xl}}{\sqrt{\beta_{xl}^2 + \beta_{yl}^2}} \right)^2 + \left(\sum_{l=1}^{N_e} \frac{\beta_{yl}}{\sqrt{\beta_{xl}^2 + \beta_{yl}^2}} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

При малом энергообмене $G_{\perp}(z)$ близка к относительной 1-й гармонике тока в пучке. В программе реализован вариант для расчета на основной гармонике $m=1$.

Результаты расчетов

Как известно [1], в рассматриваемом гофрированном волноводе обеспечивается эффективное замедление основной гармоники до значений фазовой скорости порядка $0,6 < \beta_p < 1$. При уменьшении замедления амплитуда гармоники резко убывает с удалением от гофра и при $\beta_p < 0,7$ ее взаимодействие с винтовым пучком ларморовского диаметра становится неэффективным. Исходя из значения $\beta_p = 0,7-1$, начальной скорости пучка $\beta_0 = 0,5-0,7$ при значении питч-фактора $q_0 = 1$, характерных для гиротронов и условия гирорезонанса $\gamma(1 - \beta_z / \beta_p) = F_0$ в рассматриваемой системе (рис. 1), можно реализовать эффективное возбуждение электромагнитного поля на основной гармонике при довольно низких значениях магнитного поля ($F_0 \sim 0,2-0,7$). Однако вопрос в том, что с уменьшением магнитного поля ларморовская толщина пучка возрастает и это приводит к снижению эффективности взаимодействия. Для выяснения условий, при которых рассматриваемое взаимодействие наиболее эффективно, были выполнены расчеты и найдены нижеописанные варианты.

Вариант 1. $\beta_0 = 0,522$ ($U_0 = 88$ кВ); $I_0 = 78$ А; $q = 1$; $F = 0,61$; $b_0 = 5$; $h_k = 1,52$; $L_k = 6$; $L_{12} = 4,067$; $h_v = 1,6$; $d_v = 26,1/25$; $e_0 = 0,02$; $\eta = 0,29$; $K_y = 19$ дБ; $U_{out} = 2$ МВт (рис. 2).

Следует заметить, что этот вариант гиротрона соответствует регенеративному усилителю. При отсутствии входного сигнала он генерирует с КПД=15%. При наличии оптимального по величине входного сигнала КПД возрастает вдвое. При этом энергия выводится вправо. Существенно, что в этом варианте рабочее магнитное поле практически вдвое меньше, чем в обычном гиротроне на H_{01} -моду на основном циклотронном резонансе.

Вариант 2 (тот же гофр что и в *варианте 1*, но без канавки). $\beta_0 = 0,522$ ($U_0 = 88$ кВ); $I_0 = 100$ А; $q = 1$; $F = 0,61$; $b_0 = 5$; $h_v = 1,62$; $d_v = 26,1/25$; $e_0 = 0,008$; $\eta = 0,24$; $K_y = 6$ дБ (выходит как вправо так и влево); $U_{out} = 2,1$ МВт (рис. 3).

Этот вариант гиротрона имеет очень малый коэффициент усиления. Энергия выводится и вправо, и влево почти одинаково. За счет введения отражающей нерегулярности на входе (например, резонансной канавки) поток энергии можно направить только вправо (на выходной конец прибора).

Однако требуемое для его работы на первой гармонике циклотронной частоты магнитостатическое поле приблизительно вдвое меньше ($F = 0,61$) чем для обычной гиро-ЛБВ на H_{01} -моду квазирегулярного волновода.

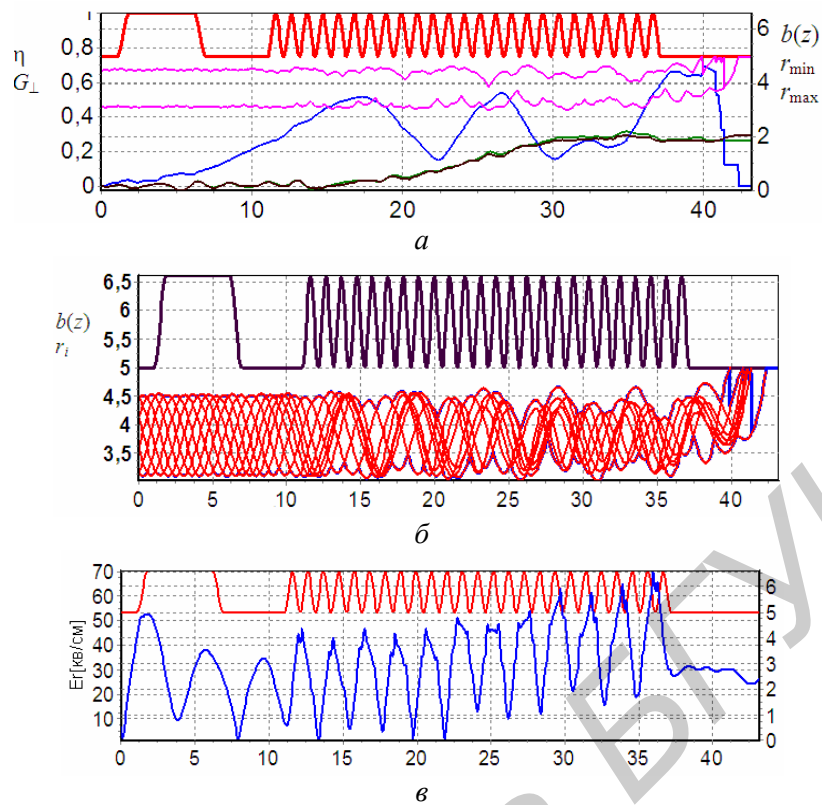


Рис. 2. Распределение характеристик взаимодействия по длине гиротрона: КПД, G_r , r_{\min} , r_{\max} (а); траектории (б); Er на уровне $r=4$ для $\lambda=1$ см. ($En=270$ кВ/см) $\beta_{p0}\sim 0,7$ (в)

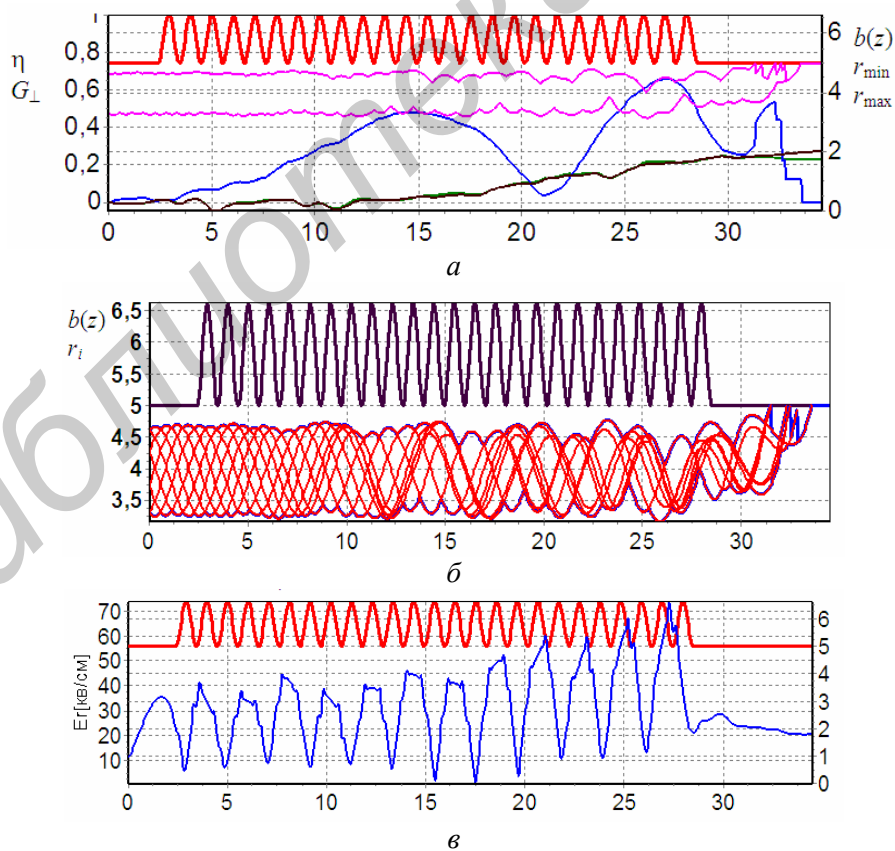


Рис. 3. Распределение характеристик взаимодействия по длине гиротрона: КПД, G_r , r_{\min} , r_{\max} (а); траектории (б); Er на уровне $r=4$ для $\lambda=1$ см ($En=270$ кВ/см) $\beta_{p0}\sim 0,67$ (в)

Вариант 3. $\beta_0=0,7$ ($U_0=204$ кВ); $I_0=166$ А; $q=1$; $F=0,71$; $b_0=5$; $h_v=1,21$; $d_v=30,3/25$; $e_0=0,02$; $\eta=0,20$ $K_y=24$ дБ; $U_{out}=6,8$ МВт (рис. 4).

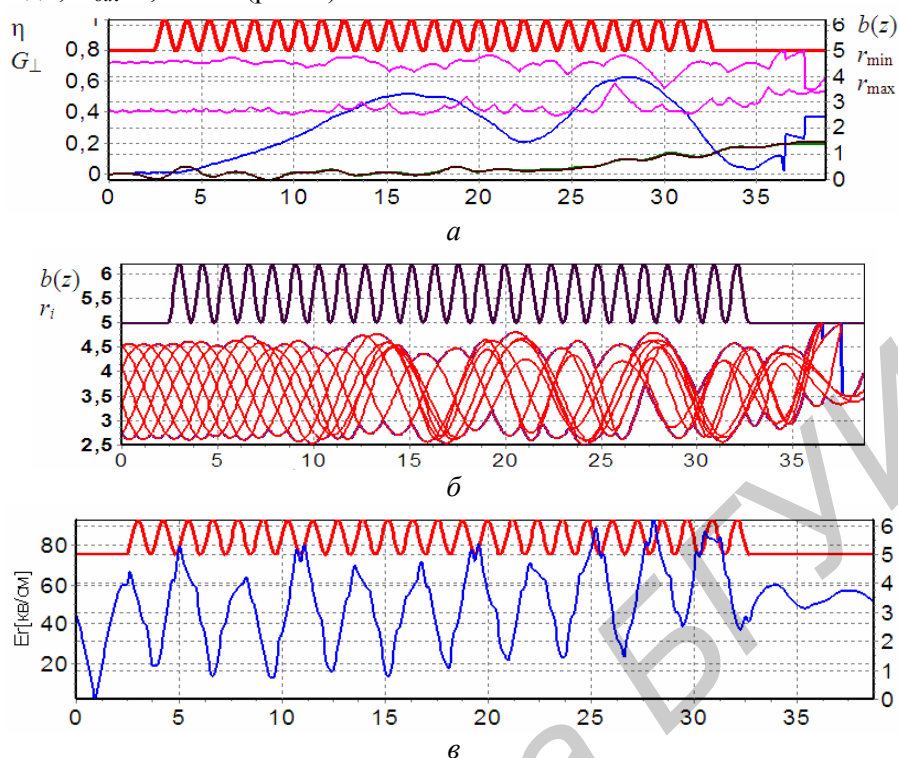


Рис. 4. Распределение характеристик взаимодействия по длине гиротрона: КПД, Gr , r_{\min} , r_{\max} (а); траектории (б); Er на уровне $r=4$ для $\lambda=1$ см ($En=260$ кВ/см) $\beta_{p0}\sim 1$ (в)

Этот вариант гиротрона является чистым усилителем, в котором вся энергия выводится вправо. Он имеет достаточно высокий коэффициент усиления для обычных gyro-ЛБВ с регулярным волноводом на H_{01} -моде (24 дБ) и также типичный КПД для такого класса приборов (20%). Однако требуемое для его работы на первой гармонике магнитостатическое поле существенно ниже ($F=0,71$).

Заключение

Приведенные в статье материалы позволяют сделать следующие основные выводы.

- гиротрон на замедленной E_{0r} -моде имеет не худшие выходные характеристики, чем обычный гиротрон на H_{0r} -моды квазирегулярного волновода;
- в рассматриваемом гиротроне возможно снижение уровня магнитостатического поля почти в два раза по сравнению с обычным гиротроном.

Уместно также сделать следующие предположения о перспективности гиротронов на замедленной E_{0r} -моды гофрированного волновода.

- взаимодействие на высоких гармониках циклотронной частоты в этих гиротронах должно быть значительно эффективнее, чем в обычных, из-за более резкого изменения интенсивности рабочей (поверхностной) моды в поперечном сечении, чем объемной в квазигладких волноводах обычного гиротрона;

- в черенковских усилителях и генераторах на E_{0r} -моды гофрированного волновода возможно существенное увеличение КПД за счет оптимизации распределения параметров гофра (периода и глубины) вдоль области взаимодействия.

GYROTRON ON SLOWING-DOWN E_{0r} -MODE OF THE CORRUGATE WAVEGUIDE

A.A. KURAYEV, V.V. MATVEYENKO, A.K. SINITSYN

Abstract

On the base of simulation and optimization by parameters it was demonstrated that giroton on slowing down E_{0r} -mode of corrugated waveguide have not the worst output features (efficiency, power, gain factor) than usual girotron on H_{0r} -mode of quasi-regular waveguide, but this E -girotron demand only half-quality induction of magnetic field in infraction area. It is important for perspective of girotron working frequency rise.

Литература

1. Батура М.П., Кураев А.А., Синицын А.К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Мн., 2007.

Библиотека БГУИР